

Sondage à pondération spatiale d'une voie de transmission

La présente invention concerne un procédé de sondage d'une voie de transmission formée de plusieurs canaux. Il s'agit donc d'une technique connue sous le nom de diversité de réception, technique selon laquelle un récepteur comporte plusieurs antennes chacune associée à un canal de transmission distinct. En d'autres termes, l'invention propose une méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle de ces canaux de transmission.

10 En effet, dans un système de transmission, notamment par ondes radio, le récepteur reçoit pour chaque canal de transmission un signal émis par un émetteur. Le signal émis subit des fluctuations d'amplitude et de phase dans le canal de transmission, si bien que le signal reçu par le récepteur
15 ne lui est pas identique. Les fluctuations du signal sont essentiellement dues à ce que l'homme de métier appelle l'interférence intersymbole. Cette interférence peut provenir de la loi de modulation employée pour la transmission et elle est également due à la propagation
20 multi-trajets dans le canal.

Il se trouve que le signal reçu est généralement issu d'un grand nombre de réflexions dans le canal, les différents trajets empruntés par le signal émis conduisant ainsi à des retards variés au niveau du récepteur. La
25 réponse impulsionnelle du canal représente l'ensemble de ces fluctuations, auxquelles est soumis le signal émis. Il s'agit donc là de la caractéristique fondamentale représentant les transmissions entre l'émetteur et le récepteur.

30 La réponse impulsionnelle du canal est utilisée notamment par un égaliseur qui a précisément pour fonction de corriger l'interférence intersymbole dans le récepteur. Une méthode classique pour réaliser une estimation de cette réponse impulsionnelle consiste à disposer dans le signal
35 émis une séquence d'apprentissage formée de symboles connus.

Cette séquence est choisie en fonction de la loi de modulation et de la dispersion du canal, dispersion devant s'entendre ici comme le retard d'un symbole émis empruntant le trajet le plus long du canal par rapport à ce même
5 symbole empruntant le trajet le plus court. La dispersion est couramment exprimée comme un multiple de la durée qui sépare deux symboles émis successifs, soit un nombre de "durée symbole".

A titre d'exemple, on citera deux techniques connues
10 d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal de transmission.

La première technique fait appel à des séquences d'apprentissage particulières dites séquences CAZAC, pour l'expression anglo-saxonne "Constant Amplitude Zero
15 Autocorrelation". De telles séquences sont décrites dans l'article de A. MILEWSKI : "Periodic sequences with optimal properties for channel estimation and fast start-up equalization", IBM Journal of Research and Development, vol.27, N°5, Sept.83, pages 426-431.

20 Le système de radiocommunication cellulaire numérique GSM fait appel à des séquences d'apprentissage TS formées de 26 symboles notés a_0 à a_{25} prenant la valeur +1 ou -1. Ces séquences possèdent les propriétés suivantes :

$$25 \quad \sum_{i=5}^{20} a_i^2 = 16$$

$$\sum_{i=5}^{20} a_i a_{i+k} = 0 \quad \text{si } 0 < |k| \leq 5$$

En notant d la dispersion du canal qui vaut 4 dans le cas du GSM, l'estimation de la réponse impulsionnelle prend
30 la forme d'un vecteur X à 5 composants notés x_0 à x_4 .

La séquence de symboles reçus S correspondant à la séquence d'apprentissage TS est formée elle aussi de 26 symboles notés s_0 à s_{25} . On suppose naturellement ici que

l'émetteur et le récepteur sont parfaitement synchronisés et dans ce cas l'estimation de la réponse impulsionnelle X est donnée par l'expression suivante :

$$x_k = \frac{1}{16} \sum_{i=5}^{20} a_i s_{i+k} \quad \text{pour } 0 \leq k \leq 4$$

5 La technique CAZAC présente l'avantage d'une grande simplicité de mise en oeuvre. Cependant, on remarque que chaque composante de la réponse impulsionnelle est établie à partir de seulement 16 symboles reçus. Etant donné que la séquence d'apprentissage comprend 26 symboles et que la
10 dispersion du canal vaut 4, il y a de l'information dans le signal reçu qui n'est pas prise en compte et cela conduit à une réduction des performances par rapport à l'idéal théorique.

La deuxième technique connue fait appel au critère des
15 moindres carrés. Elle est décrite notamment dans les demandes de brevet FR 2 696 604 et EP 0 564 849. En matière de rappel, cette technique fait appel à une matrice de mesure A construite à partir de la séquence d'apprentissage TS de longueur n . Cette matrice comprend $(n-d)$ lignes et
20 $(d+1)$ colonnes, d représentant toujours la dispersion du canal. L'élément figurant à la i ème ligne et à la j ème colonne est le $(d+i-j)$ ème symbole de la séquence d'apprentissage :

25

$$A = \begin{pmatrix} a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{25} & \dots & \dots & \dots & a_{21} \end{pmatrix}$$

La séquence d'apprentissage est choisie telle que la matrice $A^t A$ soit inversible où l'opérateur $.^t$ représente la transposition. C'est naturellement le cas pour les séquences CAZAC mais c'est également le cas pour d'autres séquences.

5 Dans la séquence de symboles reçus, on ne prend pas en compte les quatre premiers s_0 à s_3 car ceux-ci dépendent également de symbole inconnus émis avant la séquence d'apprentissage, étant donné que la dispersion du canal vaut 4. Par un abus de langage on définira donc dorénavant le
10 signal reçu comme un vecteur S ayant pour composantes les symboles reçus, $s_4, s_5, s_6, \dots, s_{25}$.

Dès lors, l'estimation de la réponse impulsionnelle prend la forme suivante :

$$X = (A^t A)^{-1} A^t . S$$

15 Cette technique des moindres carrés est un peu plus complexe que la précédente mais il faut noter que la matrice $(A^t A)^{-1} A^t$ est calculée une seule fois. On remarque ici que chacune des composantes de l'estimation de la réponse impulsionnelle X est établie à partir de 22 symboles reçus
20 et non pas de 16 comme dans le cas de la technique CAZAC. On doit donc s'attendre à une amélioration des performances.

Cependant, quelle que soit la technique utilisée, les réponses impulsionnelles de chacun des canaux de la voie de transmission sont considérées comme indépendantes.

25 La présente invention a ainsi pour premier objet un procédé de sondage d'une voie de transmission qui prend en compte le fait que les différentes antennes sont spatialement liées.

Selon l'invention, le procédé de sondage d'une voie de
30 transmission s'applique lorsque cette voie est formée de plusieurs canaux et il nécessite une estimation de la réponse impulsionnelle C_1, C_2, \dots, C_n de ces canaux. Le procédé comprend les étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de
35 transmission,

- établissement d'une réponse impulsionnelle corrigée au moins par pondération de ces estimations de réponses impulsionnelles au moyen de cette statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif de ces canaux.

- 5 ~~Avantageusement~~, cette statistique spatiale correspond à une estimation de la corrélation des canaux de transmission pris deux à deux.

Suivant un mode de réalisation préférentiel, cette estimation de la corrélation des canaux de transmission
10 prend la forme d'une matrice de corrélation spatiale ainsi définie que l'élément figurant à la ième ligne et à la jème colonne soit obtenu par lissage du produit de la transposée hermitienne de la réponse impulsionnelle estimée du ième canal et de la réponse impulsionnelle estimée du jème
15 canal.

Selon une caractéristique additionnelle, un signal reçu S par un premier canal correspondant à une séquence d'apprentissage émise, en notant A la matrice de mesure associée à cette séquence d'apprentissage, l'estimation du
20 bruit additif N_{01} de ce canal est obtenue par normalisation de l'énergie du vecteur $(S - AC_1)$.

On peut prévoir que cette normalisation soit suivie d'une étape de moyennage.

De plus, une matrice de bruit N étant formée à partir
25 de l'estimation du bruit additif $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$ des canaux, une matrice de pondération spatiale G' étant ainsi définie à partir de la matrice de corrélation spatiale G et de la matrice de bruit :

$$G' = G (G + N)^{-1},$$

30 les réponses impulsionnelles corrigées C'_1, C'_2, \dots, C'_n sont obtenues par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} c_1^t \\ c_2^t \\ \vdots \\ c_n^t \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} c_1^t \\ c_2^t \\ \vdots \\ c_n^t \end{pmatrix}$$

Le procédé de sondage d'une voie de transmission est donc mis en oeuvre à partir de l'estimation de la réponse impulsionnelle des différents canaux considérés comme autant
5 de canaux indépendants. Or les erreurs d'estimation sont inévitables. De manière générale, la détermination de la réponse impulsionnelle d'un canal de transmission unique est un problème qui ne peut être résolu de façon exacte en présence de bruit additif. De plus les techniques
10 antérieures font l'hypothèse implicite que cette réponse impulsionnelle peut prendre une forme quelconque.

La présente invention a ainsi pour deuxième objet une méthode d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal de transmission qui présente une meilleure résistance au
15 bruit additif ou, autrement dit, qui mène à une erreur réduite comparée à l'erreur d'estimation des techniques connues. Cette méthode sera avantageusement appliquée pour l'un au moins des canaux formant la voie de transmission avant l'établissement des réponses impulsionnelles corrigées
20 par pondération au moyen de la statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif de ces canaux.

Selon l'invention, cette méthode nécessite un signal reçu par un canal, ce signal reçu correspondant à une séquence d'apprentissage émise. La méthode comprend les
25 étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique temporelle de ce canal de transmission,
- établissement de l'estimation de la réponse impulsionnelle de ce canal, cette estimation étant pondérée par la
30 statistique temporelle du canal au moyen du signal reçu.

La statistique temporelle du canal représente une valeur de la réponse impulsionnelle antérieure à l'acquisition du signal reçu. La susdite pondération introduit le fait que la réponse impulsionnelle afférente au signal reçu a une valeur probablement plus proche de cette valeur antérieure qu'une valeur qui en serait très éloignée. Ainsi, statistiquement, l'erreur d'estimation est diminuée.

Avantageusement, cette statistique correspond à une estimation de la covariance de cette réponse impulsionnelle.

10 Selon une première variante du procédé, celui-ci comprend les étapes suivantes :

- lissage de la réponse impulsionnelle et orthonormalisation au moyen d'une matrice de transformation W pour obtenir l'estimation de la covariance qui prend alors la forme d'une
15 matrice L',

- recherche des vecteurs propres v_i' et valeurs propres λ_i' associées de cette matrice L',

- estimation de la réponse impulsionnelle instantanée du canal à partir du signal reçu et application de cette
20 matrice de transformation W pour former un vecteur X',

l'établissement de l'estimation pondérée x_p étant ainsi réalisée :

$$x_p = \sum \left(\frac{\lambda_i' - N_0}{\lambda_i'} (v_i'^h \cdot x') \right) W v_i'^h$$

où N_0 est un nombre réel strictement positif représentant le
25 bruit additif du canal.

On peut ici prévoir que le bruit additif soit choisi égal à la plus petite des valeurs propres λ_i' .

Lorsqu'un sous-ensemble de ces valeurs propres λ_i' présente une contribution inférieure à un seuil
30 prédéterminé, on peut également prévoir que chacune de ces valeurs propres soit forcée à la valeur du bruit additif.

La complexité s'en trouve réduite d'autant.

Selon une seconde variante du procédé, l'estimation de la covariance prenant la forme d'une matrice R, en notant A

la matrice de mesure associée à la séquence d'apprentissage, l'établissement de l'estimation pondérée est ainsi réalisé :

$$X_p = (A^t A + N_0 R^{-1})^{-1} A^t . S$$

où N_0 est un réel strictement positif représentant le bruit additif du canal.

Par ailleurs, il est possible d'effectuer une étape d'orthonormalisation de la matrice R au moyen d'une matrice de transformation W pour obtenir une nouvelle matrice R' , l'estimation pondérée prenant alors la nouvelle forme suivante :

$$X_p = W^t (I + N_0 R'^{-1})^{-1} W^t A^t . S$$

où la matrice A' est égale au produit de la matrice de transformation W et de la matrice de mesure A .

Avantageusement, l'expression $(I + N_0 R'^{-1})^{-1}$ est calculée au moyen du lemme d'inversion matricielle.

La présente invention apparaîtra maintenant de manière plus détaillée dans le cadre de la description qui suit où sont proposés des exemples de mise en oeuvre à titre illustratif, ceci en référence aux figures annexées qui représentent :

- la figure 1, un diagramme identifiant les principales étapes d'un mode de mise en oeuvre du procédé de sondage d'une voie de transmission selon l'invention,
- la figure 2, une première variante d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal selon l'invention,
- la figure 3, une deuxième variante d'estimation de la réponse impulsionnelle d'un canal selon l'invention.

L'invention sera présentée dans son application au GSM car ce système a le mérite d'être bien connu de l'homme du métier. Il s'agit donc là d'une présentation adoptée dans un souci de clarté mais il ne faut y voir en aucun cas une limitation de l'invention à ce seul système.

En référence à la figure 1, le procédé de sondage d'une voie de transmission s'applique lorsque cette voie comporte au moins deux canaux de transmission, n canaux dans le cas général. Les canaux correspondent chacun à une

antenne distincte. On considère donc que chaque canal a fait l'objet d'une estimation de sa réponse impulsionnelle respective C_1, C_2, \dots, C_n selon l'une quelconque des techniques disponibles.

- 5 En premier lieu le procédé prévoit l'acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de transmission. Par statistique spatiale on entend un ensemble de données reflétant le comportement de cette voie sur une période prédéterminée que l'on conviendra d'appeler période de
- 10 corrélation. En effet, les différentes antennes étant fixes, les signaux reçus sur ces antennes présentent un certain degré de corrélation. L'invention entend précisément tirer parti de ce fait pour améliorer la qualité d'estimation de la réponse impulsionnelle de l'un des canaux au moins. A
- 15 titre d'exemple, une telle statistique peut être obtenue au moyen d'une matrice de corrélation spatiale G :

$$G = \begin{pmatrix} v(c_1^h c_1) & v(c_1^h c_2) & \dots & v(c_1^h c_n) \\ v(c_2^h c_1) & v(c_2^h c_2) & \dots & v(c_2^h c_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v(c_n^h c_1) & v(c_n^h c_2) & \dots & v(c_n^h c_n) \end{pmatrix}$$

où l'opérateur $.^h$ représente la transposition hermitienne.

- 20 Cette matrice G carrée de dimension (n,n) peut ainsi être représentée de manière générique par l'élément g_{ij} figurant à la i ème ligne et à la j ème colonne :

$$g_{ij} = v(c_i^h c_j)$$

- Cet élément g_{ij} est obtenu par lissage du produit $c_i^h c_j$
- 25 au moyen des réponses impulsionnelles estimées C_i, C_j des i ème et j ème canaux obtenues durant la période de corrélation. Ce lissage est une estimation de la corrélation de ces deux canaux.

On entend ici lissage dans un sens très général, c'est-à-dire toute opération permettant de lisser ou de moyenner le produit $C_i^h C_j$ sur la période de corrélation.

Un premier exemple de lissage consiste à faire la
5 moyenne de ce produit sur cette période supposée comprendre e estimations successives de chacune des réponses impulsionnelles C_1, C_2, \dots, C_n :

$$v(C_i^h C_j) = \frac{1}{e} \sum_1^e C_i^h C_j$$

10 Un deuxième exemple de lissage consiste à actualiser, à la p ème estimation reçue pour chacun des i ème et j ème canaux, l'expression de lissage $v_{p-1}(C_i^h C_j)$ obtenue à la $(p-1)$ ème estimation au moyen d'un coefficient multiplicatif α , ce coefficient compris entre 0 et 1 étant
15 souvent connu sous le nom de facteur d'oubli de lissage :

$$v_p(C_i^h C_j) = \alpha C_i^h C_j + (1-\alpha) v_{p-1}(C_i^h C_j)$$

L'initialisation peut se faire par tous moyens, notamment au moyen de la première estimation obtenue ou bien par une moyenne obtenue comme dans le premier exemple pour
20 les premières estimations reçues.

Le procédé de sondage propose ensuite de réaliser une estimation du bruit additif $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$ présent dans chacun des canaux au moyen des estimations des réponses impulsionnelles respectives C_1, C_2, \dots, C_n de ces canaux.

25 Il sera proposé différentes solutions pour mener à bien cette estimation du bruit et on traitera le cas d'un seul canal, le premier par exemple, étant donné que les mêmes solutions s'appliquent à chacun des canaux.

Une solution simple consiste à affecter N_{01} d'une
30 valeur prédéterminée qui reflète un seuil en dessous duquel il est peu probable que le bruit additif puisse descendre. Cette valeur pourrait être déterminée par une mesure de

rapport signal à bruit, ou par les performances du récepteur, ceci à titre d'exemple.

Par ailleurs, l'estimation du bruit N_{01} peut être obtenue au moyen de l'estimation de la réponse
5 impulsionnelle C_1 du premier canal et du signal reçu correspondant S . Cette estimation du bruit a donc pu être réalisée avant la mise en oeuvre du procédé de sondage à pondération spatiale selon quelque technique que ce soit. Toutefois, si ce n'était pas le cas, on propose ici une
10 méthode appropriée lorsque l'estimation de la réponse impulsionnelle C_1 est acquise selon la technique des moindres carrés.

Il s'agit donc d'estimer directement le bruit additif à partir du signal reçu S et de la matrice de mesure A . En
15 effet, en notant N_1 le vecteur bruit affectant le signal reçu, il vient que :

$$S = AC_1 + N_1$$

Compte tenu du fait que les vecteurs S et N_1 ont 22 composantes, l'estimation du bruit N_{01} prend la forme
20 suivante :

$$N_{01} = \left(\frac{1}{22}\right) (S - AC_1)^h (S - AC_1)$$

Naturellement cette estimation du bruit additif N_{01} peut être moyennée ou lissée.

A partir des estimations du bruit additif des
25 différents canaux $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$, on construit une matrice de bruit N dont l'élément figurant à la i ème ligne et à la j ème colonne est noté n_{ij} .

Lorsque i est égal à j , cet élément n_{ij} prend la valeur du bruit estimé N_{0i} .

30 Lorsque i et j sont différents, l'élément n_{ij} est nul.

Par ailleurs, toujours dans un souci de simplification, il est possible de calculer la valeur moyenne N_0 des bruits estimés $N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}$ et de forcer chacun des éléments n_{ij} de la diagonale de cette
35 matrice N à cette valeur moyenne N_0 . En notant I la matrice

identité, il s'ensuit que la matrice de bruit N prend la forme suivante :

$$N = N_0 I$$

La matrice de corrélation G et la matrice de bruit N
5 permettent de définir une nouvelle matrice, la matrice de pondération spatiale G' :

$$G' = G(G + N)^{-1}$$

Les réponses impulsionnelles corrigées C'_1, C'_2, ..., C'_n
10 au moyen de cette matrice de pondération spatiale G' sont ainsi définies :

$$\begin{pmatrix} C'_1{}^t \\ C'_2{}^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C'_n{}^t \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} C_1{}^t \\ C_2{}^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_n{}^t \end{pmatrix}$$

où l'opérateur .^t représente toujours la transposition.

L'une au moins des réponses impulsionnelles corrigées
15 C'_1 est utilisée à la place de l'estimation de la réponse impulsionnelle C_1 dans le récepteur.

A titre optionnel, l'invention permet également d'améliorer l'estimation de la réponse impulsionnelle C_1, C_2, ..., C_n de chacun des canaux, ceci avant la mise en
20 oeuvre du procédé de sondage à pondération spatiale d'une voie de transmission, c'est-à-dire avant l'établissement de la ou des réponses impulsionnelles corrigées C'_1, C'_2, ..., C'_n.

On prévoit ainsi l'acquisition d'une statistique
25 temporelle pour l'un au moins de ces canaux, le premier par exemple. Par statistique temporelle, on entend un ensemble de données reflétant le comportement de ce canal considéré indépendamment des autres canaux sur une période prédéterminée que l'on conviendra d'appeler période
30 d'analyse. Il s'agit donc d'une représentation du comportement moyen du canal pendant la période d'analyse.

Cette statistique peut être établie par quelque moyen que ce soit et en quelque lieu que ce soit. En effet, l'établissement de la statistique peut prendre place dans un équipement quelconque du réseau de radiocommunication. Ce
 5 qui importe c'est que le récepteur puisse acquérir cette statistique.

A titre d'exemple, une telle statistique temporelle peut être obtenue de la manière suivante.

Au moyen du signal reçu S pendant la période
 10 d'analyse, on calcule une estimation X de la réponse impulsionnelle selon une méthode connue.

Si l'on retient la technique des moindres carrés cette estimation X vaut :

$$X = (A^t A)^{-1} A^t S \quad (1)$$

15 On rappelle ici que l'émetteur et le récepteur sont supposés synchronisés à mieux que un demi-symbole près, auquel cas le signal de réception est formé par le vecteur S dont les composantes sont les symboles reçus s_4 à s_{25} synchrones des symboles a_4 à a_{25} de la séquence
 20 d'apprentissage TS . Si une telle synchronisation n'était pas acquise, plusieurs solutions sont disponibles pour l'acquérir et on en citera deux à titre d'exemple.

La première solution consiste à décaler le signal reçu en avance ou en retard de j périodes symboles de sorte que
 25 $S_j^t = (s_{4-j}, s_{5-j}, s_{6-j}, \dots, s_{25-j})$.

On calcule alors l'estimation X_j pour chacun des vecteurs S_j et on retient la valeur j_M pour laquelle $X_j^h \cdot X_j$ est maximal. Cette valeur j_M donne la synchronisation escomptée et il suffit de remplacer le vecteur S dans
 30 l'équation (1) par le vecteur S_{j_M} .

La deuxième solution consiste à augmenter artificiellement la dispersion d du canal d'une quantité $2q$ prédéterminée. On peut alors définir une matrice de mesure modifiée A_m comprenant $(n-d-2q)$ lignes et $(d+2q+1)$ colonnes.
 35 En reprenant les valeurs 26 et 4 respectivement pour n et d :

$$A_m = \begin{pmatrix} a_4 + 2q \dots a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 + 2q \dots a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_6 + 2q \dots a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 + 2q \dots & & & & \\ \dots & & & & \\ \dots & & & & \\ a_{25} \dots & & & a_{21} - 2q & \end{pmatrix}$$

Il faut alors réduire le nombre de composantes du signal reçu S de cette même quantité 2q et on peut convenir de retenir le 5 vecteur S_m modifié :

$$S_m^t = (s'_{4+q}, s'_{5+q}, \dots, s'_{25-q})$$

On obtient ainsi une estimation modifiée X_m :

$$X_m = (A_m^t A_m) A_m^t \cdot S_m$$

Cette estimation modifiée X_m comporte d+2q+1 10 composantes :

$$X_m^t = (x_{-q}, \dots, x_0, x_1, \dots, x_4, \dots, x_{4+q})$$

On recherche alors la valeur j_M de j comprise entre -q et +q qui maximise l'expression suivante :

$$\sum_{k=0}^4 x_j^* + k x_{j+k}$$

15 où l'opérateur $.*$ représente la conjugaison complexe.

Cette valeur j_M détermine l'estimation X de la réponse impulsionnelle pour une dispersion d=4 :

$$X^t = (x_{j_M}, x_{j_M+1}, \dots, x_{j_M+4})$$

La synchronisation s'en déduit immédiatement en 20 appliquant le décalage j_M au signal reçu S.

On peut dès lors appliquer à nouveau l'équation (1).

On construit maintenant une matrice de lissage L par lissage des différentes estimations X obtenues pendant la période d'analyse pour obtenir une estimation de la

covariance associée à cette réponse impulsionnelle. On entend ici lissage dans un sens très général, c'est-à-dire toute opération permettant de lisser ou de moyenner la réponse impulsionnelle sur la période d'analyse. On obtient
 5 ainsi une représentation statistique du comportement du canal de transmission. Ce lissage peut être obtenu notamment par l'une des deux méthodes proposées ci-dessus, l'expression la plus simple de cette matrice de lissage L étant la suivante :

$$10 \quad L = \frac{1}{m} \sum_{\mathbf{I}} \mathbf{X} \mathbf{X}^h$$

où m correspond au nombre de séquences d'apprentissage sur lequel est calculé le lissage.

On admet ici que cette matrice de lissage peut être approchée par l'équation suivante :

$$15 \quad L \simeq (\mathbf{A}^t \mathbf{A})^{-1} \mathbf{N}_0 + \mathbf{R} \quad (2)$$

où \mathbf{N}_0 représente toujours le bruit présent dans le canal de transmission ou bruit additif et où \mathbf{R} est une matrice que l'on a coutume d'appeler statistique à priori du canal car elle représente le comportement du canal
 20 abstraction faite du bruit.

On admet également que la matrice de mesure \mathbf{A} est bien conditionnée, c'est-à-dire que les valeurs propres de la matrice $\mathbf{A}^t \mathbf{A}$ sont très proches les unes des autres. Dans ce cas, il est intéressant de procéder à l'orthonormalisation
 25 des vecteurs constitués par les lignes de la matrice de mesure \mathbf{A} , mais il ne faut pas voir là une limitation de l'invention.

Pour ce faire, on emploie une matrice de transformation \mathbf{W} telle que :

$$30 \quad \mathbf{A}' = \mathbf{A} \mathbf{W} \text{ et } \mathbf{A}'^t \mathbf{A}' = \mathbf{I}$$

où \mathbf{I} représente la matrice identité.

En notant \mathbf{L}' la matrice ainsi définie :

$$\mathbf{L} = \mathbf{W} \mathbf{L}' \mathbf{W}^t,$$

il vient que l'équation (2) peut maintenant s'écrire :

$$35 \quad \mathbf{L}' \simeq \mathbf{N}_0 \mathbf{I} + \mathbf{R}' \quad (3)$$

Selon une première variante représentée à la figure 2, on remarque que les vecteurs propres v_i' de L' et v_i de R' sont identiques tandis que les valeurs propres λ_i' de L' et λ_i de R' sont décalées de N_0 . Soit en prenant toujours la même valeur de 4 pour la dispersion du canal, pour tout i compris entre 0 et 4 :

$$v_i' = v_i$$

$$\lambda_i' = \lambda_i + N_0$$

Il apparaît ainsi que la détermination des vecteurs propres et valeurs propres de R' et celle de L' sont identiques sous réserve que N_0 soit connu.

L'étape d'estimation du bruit sera décrite plus loin pour rendre l'exposé plus clair, bien que cette étape précède celle qui va maintenant être explicitée.

Il convient donc maintenant de rechercher les couples valeur-propre/vecteur-propre pour l'une ou l'autre des matrices L' ou R' . Cette étape ne sera pas plus détaillée car bien connue de l'homme du métier. Par ailleurs, il va sans dire que l'on peut annuler les valeurs propres dont la contribution est jugée non significative. Par exemple, si ces valeurs propres sont classées par ordre décroissant, on supprime les dernières qui sont telles que leur somme soit inférieure à un seuil prédéterminé.

L'étape suivante consiste à estimer la réponse impulsionnelle instantanée X établie selon l'une quelconque des techniques connues à partir du signal reçu correspondant à la dernière séquence d'apprentissage reçue. En notant $X = WX'$, cette dernière estimation est pondérée par la méthode suivante pour obtenir une pondération temporelle X_p de la réponse impulsionnelle instantanée :

$$X_p = \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i + N_0} (v_i^h X') \right) w v_i$$

$$X_p = \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\lambda_i' - N_0}{\lambda_i'} (v_i^h X') \right) w v_i$$

Pour obtenir la pondération X_p il faut donc estimer le bruit additif N_0 .

Cette estimation du bruit peut être effectuée notamment selon l'une des méthodes exposées plus haut.

- 5 Une autre possibilité consiste à considérer que la dernière valeur propre, (la plus faible) de la matrice de lissage L est égale à N_0 :

$$\lambda_4' = N_0 \text{ ou } \lambda_4 = 0.$$

- 10 Quelle que soit la méthode retenue, la pondération temporelle X_p de l'estimation de la réponse impulsionnelle instantanée peut alors être réalisée comme mentionné ci-dessus.

Selon une seconde variante représentée à la figure 3, on établit l'estimation pondérée X_p directement comme suit :

15
$$X_p = (A^t A + N_0 R^{-1})^{-1} A^t . S$$

ou bien en reprenant la matrice de transformation W définie ci-dessus :

$$X_p = W (I + N_0 R'^{-1})^{-1} W^t A^t . S \quad (4)$$

Conformément à l'équation (3) :

20
$$R' = L' - N_0 I$$

Il convient là aussi d'estimer le bruit additif N_0 .

Une solution avantageuse pour obtenir la pondération temporelle X_p consiste à adopter la méthode suivante.

On divise la matrice R' par N_0 :

25
$$B = \frac{R'}{N_0}$$

Il s'ensuit que :

$$I + N_0 R'^{-1} = I + B^{-1}$$

On utilise le lemme d'inversion matricielle pour calculer la matrice de pondération $P = (I + B^{-1})^{-1}$.

- 30 Ainsi, en notant e_i les vecteurs canoniques, on procède à l'itération suivante :

- initialisation :

$$P = B$$

- pour i variant de 0 à d (4 dans le cas présent) :

$$P = P - \frac{Pe_i (Pe_i)^h}{1 + e_i^h Pe_i}$$

P étant connu, il reste à établir la pondération X_p selon l'équation (4).

On remarquera que la matrice de pondération P n'est pas nécessairement calculée à l'occasion de chaque nouvelle séquence d'apprentissage émise. Elle peut être calculée à un rythme plus lent car elle varie sensiblement au même rythme que R' et donc plus lentement que le signal reçu S .

On remarquera également que l'estimation pondérée est réalisée sans avoir recours à la réponse impulsionnelle instantanée. Elle est produite directement à partir du signal reçu S .

Quelle que soit la variante retenue, c'est donc l'estimation pondérée X_p qui sera avantageusement utilisée comme estimation de la réponse impulsionnelle C_1 pour la mise en oeuvre du procédé de sondage à pondération spatiale d'une voie de transmission, c'est-à-dire pour produire une ou plusieurs réponses impulsionnelles corrigées.

REVENDICATIONS

1) Procédé de sondage d'une voie de transmission formée de plusieurs canaux, ce procédé nécessitant une estimation de la réponse impulsionnelle (C_1, C_2, \dots, C_N) de ces canaux, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique spatiale de cette voie de transmission,
- établissement d'une réponse impulsionnelle corrigée (C'_1, C'_2, \dots, C'_N) au moins par pondération desdites estimations de réponses impulsionnelles (C_1, C_2, \dots, C_N) au moyen de ladite statistique spatiale et d'une estimation du bruit additif ($N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0N}$) desdits canaux.

2) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite statistique spatiale correspond à une estimation de la corrélation desdits canaux de transmission pris deux à deux.

3) Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que cette estimation de la corrélation des canaux de transmission prend la forme d'une matrice de corrélation spatiale (G) ainsi définie que l'élément (g_{ij}) figurant à la i ème ligne et à la j ème colonne soit obtenu par lissage du produit ($C_i^h C_j$) de la transposée hermitienne de la réponse impulsionnelle estimée (C_i) du i ème canal et de la réponse impulsionnelle estimée (C_j) du j ème canal.

4) Procédé selon la revendication 3 caractérisé en ce que, un signal reçu S par un canal correspondant à une séquence d'apprentissage émise, en notant A la matrice de mesure associée à ladite séquence d'apprentissage, l'estimation du bruit additif (N_{01}) de ce canal est obtenue par normalisation de l'énergie du vecteur ($S - AC_1$).

5) Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite normalisation est suivie d'une étape de moyennage.

6) Procédé selon l'une quelconque des revendications 3 à 5 caractérisé en ce que, une matrice de

bruit (N) étant formée à partir de l'estimation du bruit additif (N_{01} , N_{02} , ..., N_{0n}) des canaux, une matrice de pondération spatiale (G') étant ainsi définie à partir de ladite matrice de corrélation spatiale (G) et de ladite

5 matrice de bruit :

$$G' = G (G + N)^{-1},$$

lesdites réponses impulsionnelles corrigées (C'_1 , C'_2 , ..., C'_n) sont obtenues par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} C'_1{}^t \\ C'_2{}^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C'_n{}^t \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} C_1{}^t \\ C_2{}^t \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_n{}^t \end{pmatrix}$$

10 7) Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 caractérisé en ce que, avant l'établissement de ladite réponse impulsionnelle corrigée (C'_1) d'un canal, le signal reçu (S) par ce canal correspondant à une séquence d'apprentissage émise, il

15 comprend les étapes suivantes :

- acquisition d'une statistique temporelle de ce canal de transmission,
- établissement de l'estimation de la réponse impulsionnelle (C_1) dudit canal, cette estimation (X_p) étant pondérée par

20 la dite statistique temporelle du canal au moyen dudit signal reçu (S).

8) Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite statistique temporelle correspond à une estimation de la covariance de ladite réponse

25 impulsionnelle.

9) Procédé selon la revendication 8 caractérise en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- lissage de ladite réponse impulsionnelle et orthonormalisation au moyen d'une matrice de transformation

30 W pour obtenir ladite estimation de la covariance qui prend alors la forme d'une matrice L' ,

- recherche des vecteurs propres (v_i') et valeurs propres (λ_i') associées de cette matrice L' ,
- estimation de la réponse impulsionnelle instantanée du canal à partir dudit signal reçu (S) et application de cette
- 5 matrice de transformation W pour former un vecteur X' ,
- l'établissement de ladite estimation pondérée (X_p) étant ainsi réalisée :

$$x_p = \sum \left(\frac{\lambda_i' - N_0}{\lambda_i'} (v_i'^h \cdot X') \right) w v_i'^h$$

où N_0 est un nombre réel strictement positif représentant le
10 bruit additif dudit canal.

10) Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit bruit additif (N_0) est choisi égal à la plus petite desdites valeurs propres (λ_i').

11) Procédé selon l'une quelconque des revendications 9
15 ou 10, caractérisé en ce qu'un sous-ensemble desdites valeurs propres (λ_i') présentant une contribution inférieure à un seuil prédéterminé, chacune de ces valeurs propres est forcée à la valeur dudit bruit additif (N_0).

12) Procédé selon la revendication 8 caractérisé en
20 ce que ladite estimation de la covariance prenant la forme d'une matrice R , en notant A la matrice de mesure associée à ladite séquence d'apprentissage, l'établissement de ladite estimation pondérée (X_p) est ainsi réalisé :

$$X_p = (A^t A + N_0 R^{-1})^{-1} A^t \cdot S$$

25 où N_0 est un réel strictement positif représentant le bruit additif dudit canal.

13) Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'orthonormalisation de ladite matrice R au moyen d'une matrice de transformation W
30 pour obtenir une nouvelle matrice R' , cette estimation pondérée prenant alors la nouvelle forme suivante :

$$X_p = W^t (I + N_0 R'^{-1})^{-1} W^t A^t \cdot S$$

où la matrice A' est égale au produit de cette matrice de transformation W et de ladite matrice de mesure A .

14) Procédé selon la revendication 13, caractérisé en ce que l'expression $(I+N_0R'^{-1})^{-1}$ est calculée au moyen du lemme d'inversion matricielle.

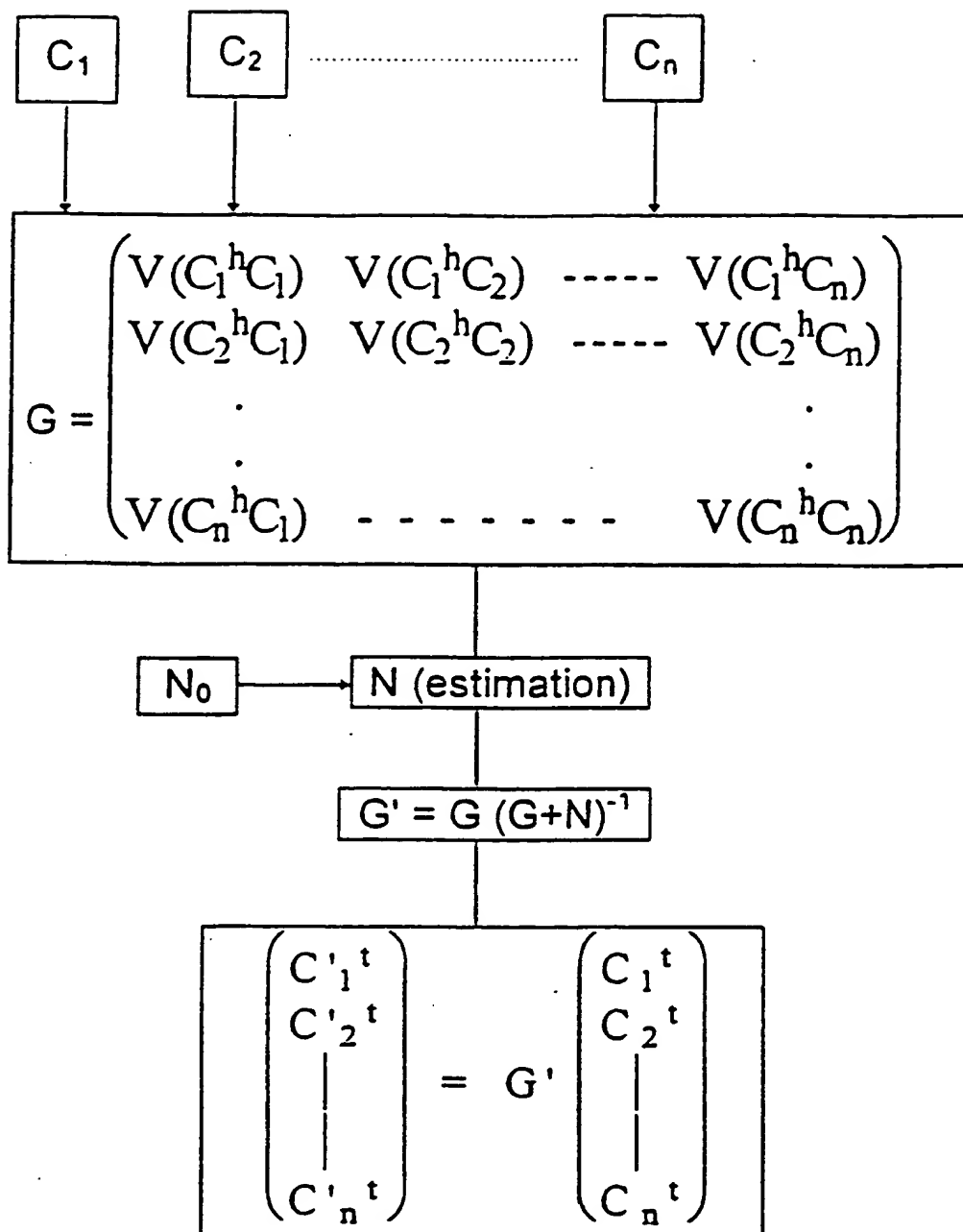


FIGURE 1

RECEIVED

Rec'd PCT/PTO 13 OCT 1999

THIS PAGE BLANK (USPTO)

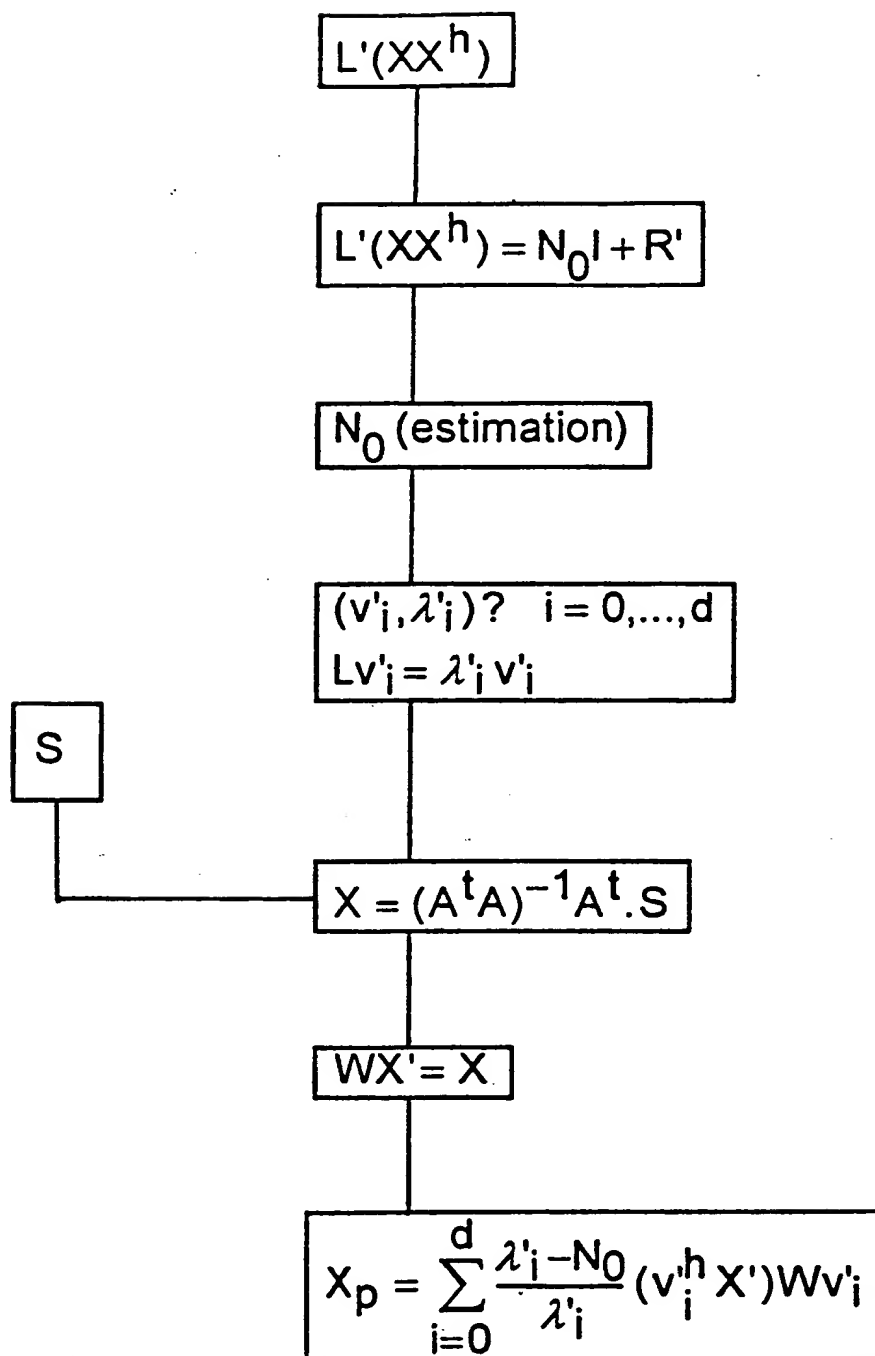


FIGURE 2

THIS PAGE BLANK (USPTO)

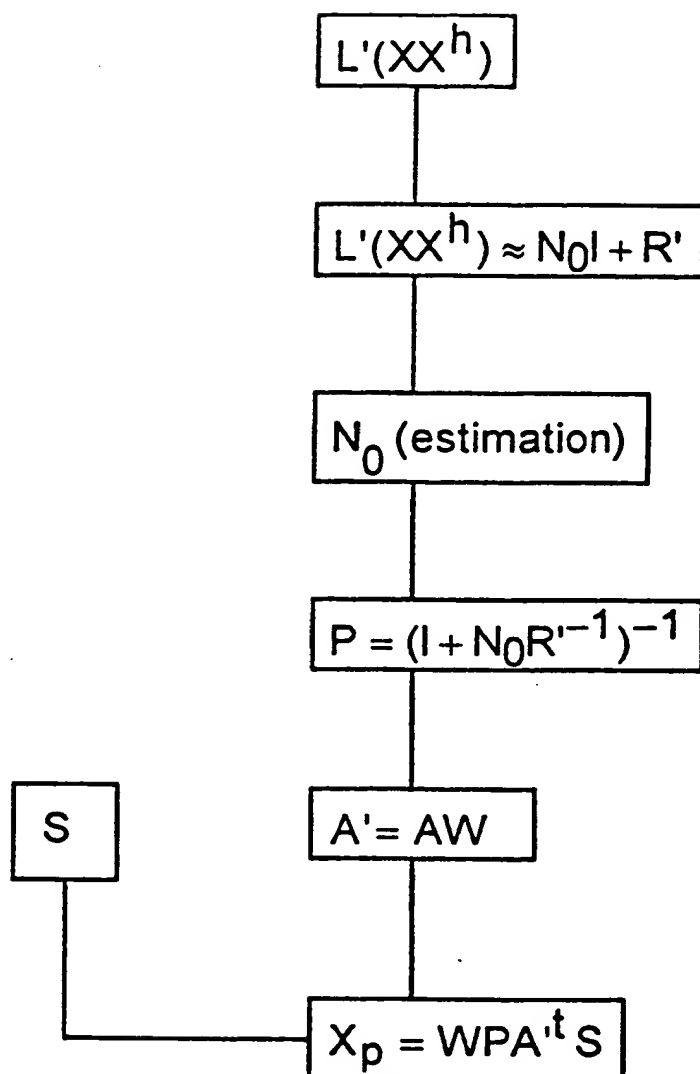


FIGURE 3

PROSOLIC

422 Rec'd PCT/PTO 13 OCT 1999

THIS PAGE BLANK (USPTO)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

National Application No
PCT/FR 98/00735A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 6 H04B7/005 H04L25/03

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6 H04B H04L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 669 729 A (THOMSON CSF) 30 August 1995 * abstract * see page 2, line 1 - line 14 see page 3, line 58 - page 5, line 1 see page 8, line 53 - page 9, line 20 see claim 1; figure 1 ---	1
A	US 5 479 446 A (MOUROT CHRISTOPHE) 26 December 1995 * abstract * see column 2, line 20 - line 39 see column 2, line 56 - column 4, line 32 see figure UNIQUE --- -/-	1

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another claim or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "S" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 September 1998

Date of mailing of the international search report

29/09/1998

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Lopez Marquez, T

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

national Application No

PCT/FR 98/00735

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>EP 0 564 849 A (IBM) 13 October 1993 * abstract * see page 6, line 19 - line 48 see claim 1; figures 1,2 -----</p>	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International Application No

PCT/FR 98/00735

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0669729 A	30-08-1995	FR 2716761 A	01-09-1995
US 5479446 A	26-12-1995	FR 2696604 A	08-04-1994
		CA 2107816 A	08-04-1994
		EP 0592294 A	13-04-1994
		FI 934359 A	08-04-1994
		JP 6224791 A	12-08-1994
EP 0564849 A	13-10-1993	US 5432816 A	11-07-1995
		JP 2677750 B	17-11-1997
		JP 6061877 A	04-03-1994

This Page Blank (uspto)